

ANALYSE EXPERIMENTALE DE L'IMPACT DE MOUVEMENTS DE TERRAIN SUR LE BATI DE SURFACE

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF GROUND MOVEMENT IMPACT ON SURFACE BUILDING

B. Hor^{1,2}, F. Emeriault¹, M. Caudron², M. Al Heib²

¹ Université de Lyon, INSA-Lyon, LGCIE, Villeurbanne, France

² INERIS, Direction des Risques du Sol et du Sous-sol, Verneuil en Halatte, France

RÉSUMÉ – L'impact de mouvements de terrain sur le bâti de surface est étudié à l'aide d'un modèle physique réduit tridimensionnel de grandes dimensions, en tenant compte de l'interaction sol/structure. Une étude paramétrique de l'effet de la position du bâtiment permet d'une part de confirmer l'importance de ce phénomène ; d'autre part, de prévoir les déplacements du bâtiment en fonction de son emplacement.

ABSTRACT – The impact of ground movement on the surface building is studied by mean of a large small-scale three-dimensional physical model, taking into account the soil/structure interaction. A parametric study regarding to the influence of building position shows the importance of soil/structure interaction, on the one hand; and allows estimating the building displacements relatively to the position.

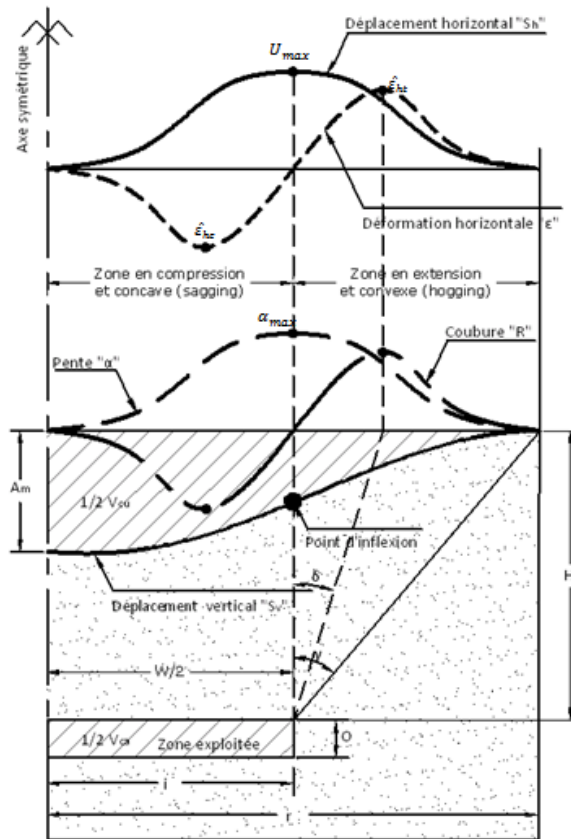
1. Introduction

Les mouvements de terrain sont les manifestations du déplacement gravitaire de terrain déstabilisées sous l'effet de sollicitations naturelles (fonte des neiges, pluviométrie anormalement forte, séisme, etc.) ou anthropiques (terrassment, vibration, déboisement, exploitation de matériaux ou de nappes aquifères, etc.). Ces mouvements peuvent dépasser certains seuils caractérisant le comportement limite des structures et être à l'origine de dégradations de bâti et d'infrastructures, voire de leur destruction et donc limiter des développements économiques et sociaux.

Les cavités souterraines naturelles ou anthropiques sont à l'origine d'affaissements et de fontis. Une cuvette d'affaissement se décompose en un mouvement vertical S_v du sol (appelé affaissement A), et des mouvements horizontaux S_h . La cuvette d'affaissement est caractérisée en chaque point par la pente α , la courbure R et les déformations horizontales ε_h (en compression et en extension). Les effets en surface peuvent se développer en dehors de l'aplomb des vides souterrains (figure 1), dans des zones limitées par l'angle d'influence.

Cet article est consacré à l'étude du phénomène d'interaction sol/structure grâce à la modélisation physique.

Une première partie sera consacrée à la présentation des caractéristiques du modèle physique réduit tridimensionnel et la réalisation d'une maquette permettant de représenter une structure simple. Puis, une étude paramétrique sera réalisée à l'aide d'une campagne expérimentale comprenant 12 essais permettant de juger de l'influence des positions respectives de l'affaissement et de la structure sur le phénomène d'interaction sol/structure. La dernière partie présentera les résultats de ces essais et l'interprétation de ceux-ci relativement aux comportements du sol et de la structure.



A_m : Affaissement maximal

U_{max} : Déplacement horizontal maximal dans la direction x

α_{max} : pente maximale

ϵ_{hc} ; ϵ_{ht} : Déformations horizontales maximales en compression et en traction.

i : Distance du centre de la cuvette au point d'inflexion

O : Ouverture de la cavité

W : Largeur de la cavité

H : Profondeur de la cavité

V_{cu} : Volume de la cuvette

V_{ca} : Volume de la cavité

r : Rayon de la cuvette

Figure 1. Principales caractéristiques des mouvements de surface de sol induits par une cavité souterraine (Deck, 2002)

2. Modèle physique

La conception générale du modèle physique réduit, ses limitations et contraintes ainsi que les données fondamentales ont été largement présentés par Caudron et al., (2008). Les lois de similitude sont rigoureusement appliquées dans la conception du modèle physique réduit. Les essais ont été réalisés sous la gravité terrestre correspondant au poids propre du sol et de la structure.

Les dimensions du modèle physique réduit sont de 2 m de largeur, 3 m de longueur et 1 m de hauteur et peut ainsi contenir approximativement 10 tonnes de sol. Le modèle physique est équipé de vérin permettant de produire un mouvement vertical à la base du sol d'une amplitude maximale de 150 mm. Les dimensions du modèle physique ont été déterminées afin de reproduire les différents types de mouvements de terrain (affaissement et fontis) et de structures en surface avec une plage de facteurs d'échelle qui s'étend de $1/10^{\text{ème}}$ à $1/50^{\text{ème}}$. Ces facteurs d'échelle géométrique sont raisonnablement utilisables pour le géomatériau considéré (sable de Fontainebleau dont les grains sont très fins compris entre 0,1 à 0,4mm). Seuls les mouvements de terrain en surface et leurs conséquences sur les structures sont investigués. L'effondrement de la cavité n'est pas modélisé. Pour reproduire les mouvements de terrain nous utilisons donc le système de vérins électromécaniques dont

la vitesse et le déplacement vertical sont contrôlables, la capacité maximale du modèle physique est de 48 vérins¹.

Une technique appelée Direct Image Correlation (DIC) a été choisie pour mesurer les déplacements en 3D et les déformations de la surface du sol. Deux caméras numériques de haute résolution dont la position relative est très précisément connue, permettent de tracer la surface 3D observée du sol pour chaque couple d'images acquies, puis pour différents couples d'images afin de déterminer le champ de déplacements et de déformations entre les instants d'acquisition (figure 2). Cette technique permet de plus une incertitude de mesure sensiblement inférieure au dixième de millimètre pour une surface « non-continue » telle que formée par le sable de Fontainebleau.

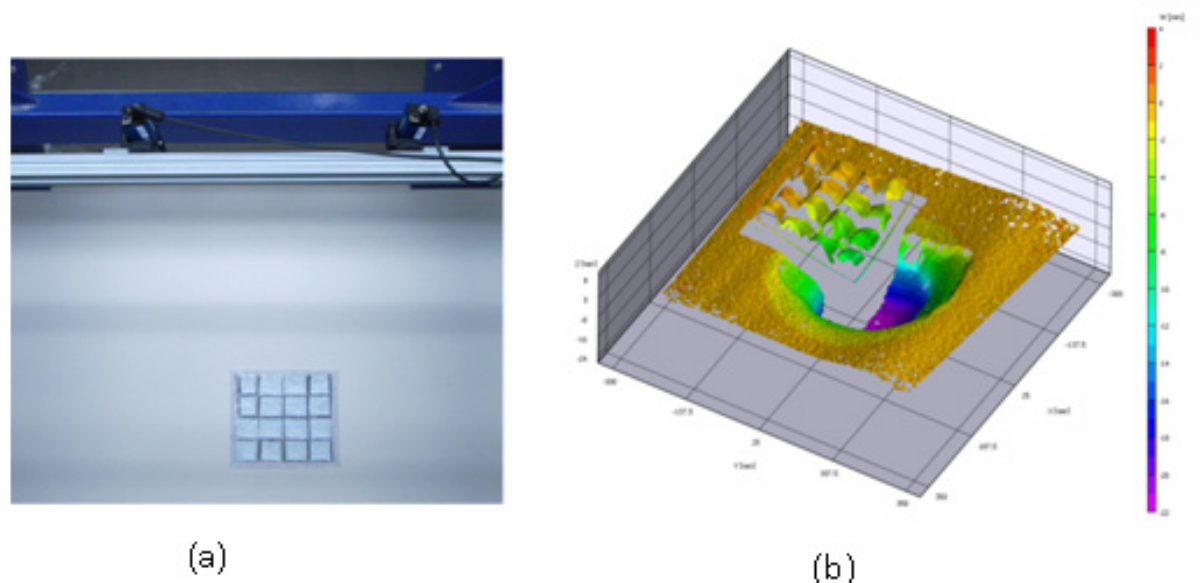


Figure 2. Instrumentation du modèle physique : (a) Les deux caméras capturant la surface du sol et la maquette de structure ; (b) Exemple de déplacements verticaux du sol et de la structure calculés par le logiciel VIC3D

La maquette de structure observable sur la figure 2 est une dalle carrée présentant un léger rebord (figure 3) qui peut être remplie de billes de plomb assurant la surcharge de la maquette pour obtenir une contrainte verticale équivalente au prototype. Les bords de la maquette visible par les caméras, permettent de suivre les déplacements de la structure par la technique DIC et d'assurer la résistance structurelle de la maquette.

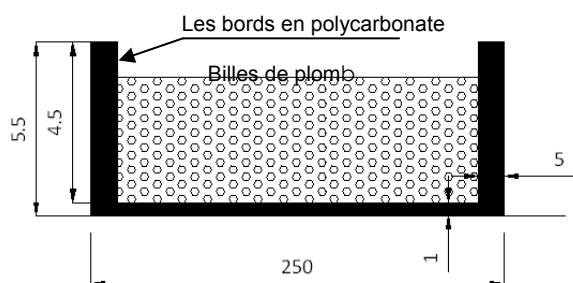


Figure 3. Géométrie de la maquette de structure (en mm)

Tableau I. Grandeurs principales de la maquette de structure

Grandeurs Physiques	Facteur d'échelle	Prototype	Maquette
Longueur (m)	1/40	10	0,25
Largeur (m)	1/40	10	0,25
Epaisseur (m)	1/40	0,25	0,00625
E (Mpa)	1/40	30000	750
E.I (Nm ²)	1/40 ⁵	3,9 10 ⁸	3,1
E.S (MN)	1/40 ³	75 000	1,17

¹ Seul un vérin est actuellement installé sur le modèle physique

La maquette de la structure doit *in fine* représenter avec un facteur d'échelle géométrique de $1/40^{\text{ème}}$ une maison individuelle de base carrée (10x10m), constituée de voiles en maçonnerie et planchers en béton armé, avec deux niveaux (R+1) et des fondations sur semelles filantes sans sous-sol. Les caractéristiques de la maquette doivent ainsi être déterminées afin que les rigidités axiale ES et en flexion EI respectent les lois de similitude et le facteur d'échelle correspondant (avec E le module d'Young du matériau utilisé, S et I sont respectivement la section et le moment d'inertie de la maquette). Une première version de maquette considère cependant une géométrie simplifiée du prototype : la maison individuelle a été remplacée par un radier en béton armé. Pourtant le comportement du radier est trop rigide. Il est donc rendu plus souple afin d'exacerber son comportement vis-à-vis d'un mouvement de terrain. Par conséquent, deux écarts entre la maquette et le prototype respectivement de -50% et de -40% vis-à-vis du comportement axial et du comportement en flexion, apparaissent.

3. Etude paramétrique

Le seul paramètre étudié ici est la position de maquette de structure par rapport à la cavité (vérin). Cette étude paramétrique s'intéresse à l'influence de la structure sur les caractéristiques de mouvements de terrain, d'une part, et aux sollicitations de la structure induites par les mouvements de terrain, d'autre part.

La cuvette d'affaissement présente une zone de déformation horizontale en compression et une autre en extension (figure 1). L'étendu de ces zones dépend des largeur et profondeur de la cavité. Des observations expérimentales, on constate que la cuvette est plus ou moins 2,5 fois plus large que la cavité, la surface de celle-ci étant identique à celle de la maquette. Trois positions différentes ont été donc réalisées (figure 4) :

- la structure est dans la zone de la pente maximale de cuvette d'affaissement (position 1) ;
- la structure se situe dans la zone de traction (position 2) ;
- et enfin elle est placée au centre de la cuvette entre les points d'inflexion et se situe entièrement dans la zone de compression (position 3).

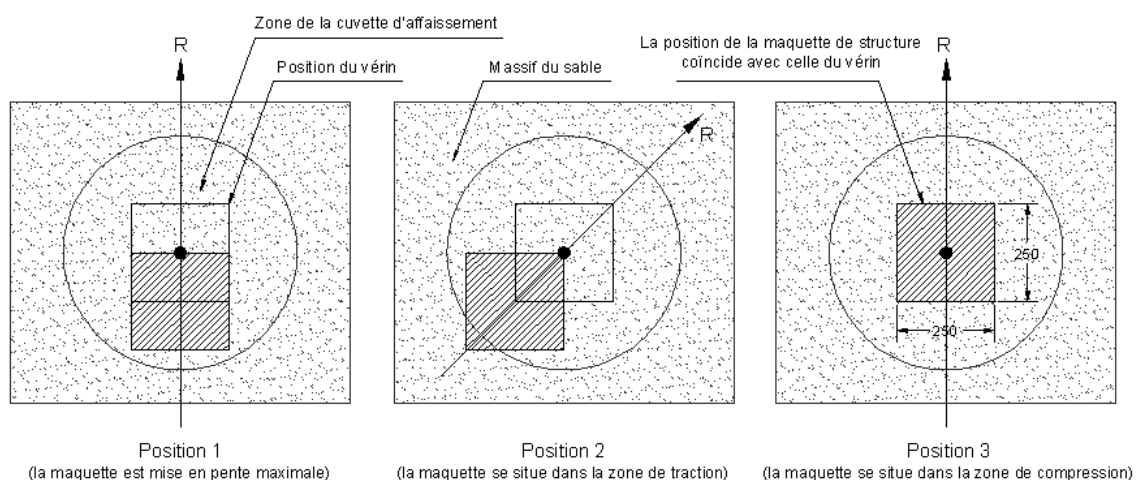


Figure 4. Illustration des 3 positions du modèle de structure par rapport à la position du vérin

Pour les positions n°1 et n°3 toute la maquette est contenue dans la cuvette, au contraire de la position n°2 où une partie de la structure repose sur une zone de sol non perturbée.

Notons que l'interaction de la maquette avec le sable passe uniquement par un contact sol-structure frottant. La maquette est posée directement sur la surface du sable, elle n'est pas encastrée dans le sol. Le tableau II présente un plan d'expérience pour l'étude paramétrique de trois différentes positions de la maquette. Quatre essais identiques ont été réalisés pour chaque position afin d'assurer la répétitivité des mesures.

Tableau II. Plan d'expérience pour l'étude paramétrique

	Nb. d'essais	H (mm)	W (mm)	O (mm)	v (mm/s)
position 1	4	300	250 x 250	30	0,15
position 2					
position 3					

H : hauteur de recouvrement du sable; W : largeur ou longueur du vérin; O : Ouverture du vérin;
 v : Vitesse d'application du vérin

4.1. Déplacements de sol en terrain vierge

L'évaluation de l'interaction sol-structure passe par la comparaison de la cuvette d'affaissement obtenue en présence de la structure avec la cuvette en terrain vierge (sans structure en surface). L'influence de la maquette sera visible à travers les variations des déplacements du sol dans les deux cas.

Caudron et al. (2004) ont montré que la cuvette en terrain vierge avec un modèle physique analogique bidimensionnel dont la cavité est rectangulaire, peut être estimée par l'approche de Peck (1969), développée pour les tunnels. L'hypothèse principale est basée sur la continuité de la cuvette d'affaissement. Cette approche ne prend en compte que les mouvements continus. La cuvette d'affaissement obtenu par le modèle physique réduit est également comparée avec l'approche de Peck (figure 5). Les profils d'affaissement (S_v) et de déplacement horizontal (S_h) de Peck (1969) dans le sens transversal peuvent s'écrire :

$$S_v(x) = A_{\max} \times e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad ; \quad S_h(x) = -\frac{x}{H} S_v(x) \quad (1) \text{ et } (2)$$

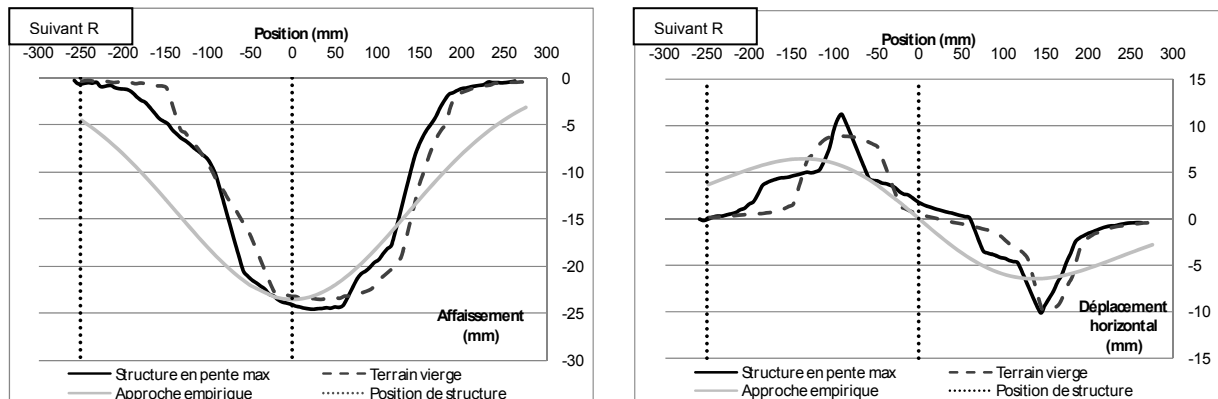
avec x la position par rapport à l'axe de cavité, H la profondeur de la cavité (ici $H = 300$ mm), et i la distance au point d'inflexion. La valeur de cette dernière sera déterminée à partir d'équation analytique d'Atkinson and Potts (1977), utilisée dans le cas de sables denses avec surcharge, et s'écrit :

$$i = 0,25(1,5H + D) \quad (3)$$

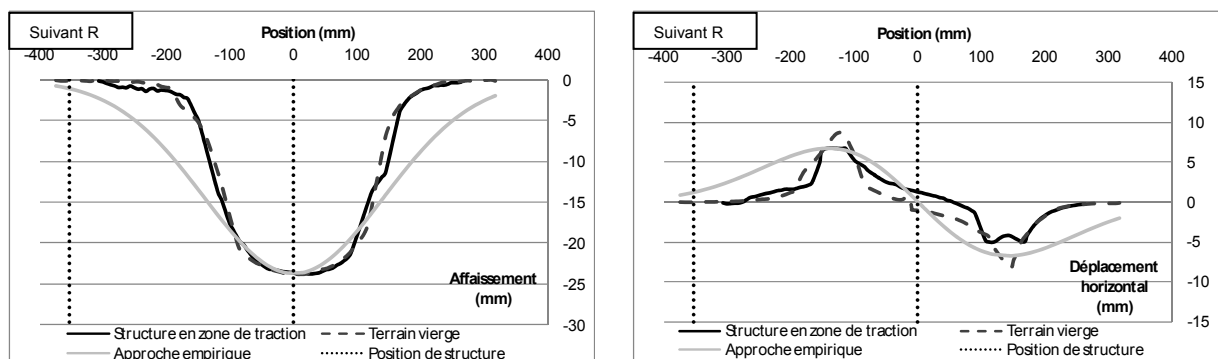
où D est le diamètre du tunnel. Caudron et al. (2004) ont montré qu'il est possible d'utiliser la relation (3) en supposant une cavité équivalente circulaire de diamètre D_{eq} , de même centre de gravité et de même surface, même si la cavité est rectangulaire. D sera donc remplacé par D_{eq} dans la détermination des valeurs de i .

4.2. Essais en présence de la structure

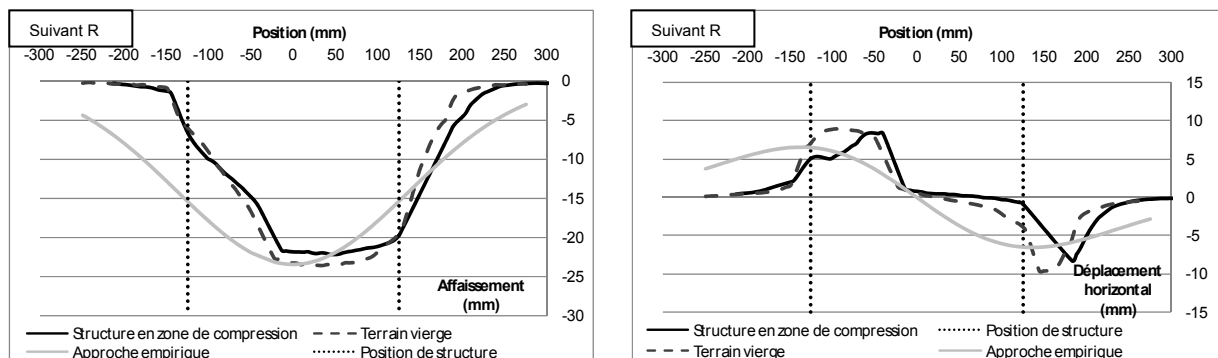
Le déplacement horizontal du sol peut être exprimé en suivant un seul axe R (figure 4) étant la direction radiale en considérant que la cuvette est circulaire. Cet axe passe par les centres de la cuvette et du vérin. Les essais dans la position 1 seront analysés suivant la direction verticale car le sol est perturbé au maximum dans cette direction, alors que pour la position 2 la direction diagonale sera prise comme référence pour l'analyse. La position 3 est centrée dans l'axe du vérin, toutes les directions sont identiquement concernées par les mouvements ; cependant la direction verticale est retenue afin de pouvoir comparer les résultats avec les autres positions.



(a) Déplacements vertical et horizontal du terrain - Position 1 (zone de pente maximale)



(b) Déplacements vertical et horizontal du terrain - Position 2 (zone de traction)



(c) Déplacements vertical et horizontal du terrain - Position 3 (zone de compression)

Figure 5. Comparaison des mouvements de terrain suivant différentes positions

4.2.1. Effet de la position de la structure vis-à-vis de déplacements du sol

Les mouvements du sol sans et avec la structure pour les trois positions sont présentés dans la figure 5. Seul un essai en présence de la structure pour chaque position parmi les quatre essais identiques est présenté, les autres essais donnant un résultat très similaire. De plus, la figure 5 montre les déplacements suivant la direction la plus influencée par la présence de la structure (différente pour chaque position étudiée). Plusieurs observations peuvent être faites :

- La présence de la structure modifie la forme de la cuvette, particulièrement quand la structure se situe en zone de pente maximale (position 1).
- L'affaissement maximal est légèrement plus faible lorsque la structure est centrée sur la cavité. La structure semble atténuer les mouvements du sol de surface vers le centre de la cavité, et aussi agrandit également la taille de la cuvette.
- Le déplacement horizontal est réduit par la présence de la structure en position 2 et 3. Il apparaît illogique que le déplacement horizontal du sol pour la position 1 soit plus important que celui en terrain vierge. Cela peut être expliqué, d'une part, par la mise en pente de la structure (position 1) permettant un glissement supplémentaire ; d'autre part le frottement est très faible à l'interface sol/structure (sable/polycarbonate) car la structure n'est pas encastree dans le sol. Enfin, le sol peut se déplacer lorsqu'on retire la maquette pour observer la cuvette d'affaissement.
- La pente semble la plus importante dans la position 1.

De manière générale, l'influence de la position de la structure est clairement manifestée et dépend largement de son emplacement dans la zone de compression ou de traction. La structure semble réduire les amplitudes dans la plupart des cas. Cette conclusion rejoint les observations faites par plusieurs auteurs vis-à-vis de l'interaction sol/structure (Caudron et al., 2008 ; Standing and Burland, 2008 ; Potts and Addenbrooke, 1997 ; Burland, 1995).

4.2.2. Effet de la position de la structure vis-à-vis de ses déplacements

Le tableau 3 présente pour chacune des 3 positions de la structure les valeurs moyennes (pour les 4 essais) des déplacements verticaux et horizontaux, des déformations et la pente de la structure, en comparant avec ceux de terrain vierge et en respectant les mêmes directions que le mouvement de sol présenté précédemment. La maquette de structure pour les trois positions se déplace avec un champ de déplacement globalement constant, à la manière d'un corps rigide.

La structure en zone de pente maximale se déplace horizontalement et se met en pente plus élevée d'environ 5% que les deux autres positions, alors que la structure en zone de compression s'affaisse le plus mais ne subit qu'une légère mise en pente de 4,9%. Ces différentes observations sont conformes à ce qui pouvait être physiquement attendu de chaque position.

Tableau III. Sollicitations pour les 3 positions de la structure et en terrain vierge

Sollicitations	Terrain vierge	Structure (position 1)	Structure (position 2)	Structure (position 3)
$S_{h,max}$ (mm)	9,6	5,8	1,9	3,9
$\epsilon_{h,max}$ (%)	10,5	0,04	0,08	-0,02
A_m (mm)	23,8	17	9,8	18,6
α_{max} (%)	21,6	11,1	6,4	4,9

Les déplacements de la structure en position 2 sont les plus faibles car la surface de la maquette concernée par la cuvette est réduite. Sa déformation horizontale, cependant, est la plus importante. Suivant la direction R, la structure se soulève de la partie arrière et perd son appui en partie avant, la déformation se développe fortement en zone restant en contact au sol. Une rotation de 4° peut être également observable dans cette configuration.

La structure ne subit qu'une partie très faible de la déformation horizontale de moins de 0,1%. Les structures se situant en zone de traction et en pente maximale subissent la déformation de traction tandis que la structure en zone de compression subit la déformation de compression.

Quel que soit la position de la structure, sa mise en pente correspond à des valeurs inférieures à celles du sol.

4. Conclusions

L'évaluation de l'impact de mouvements de terrain sur les structures nécessite de prendre en compte la structure elle-même. La modélisation physique réduite employée a permis de mettre en évidence l'importance de ce concept. L'influence de la structure se traduit par la modification de la forme et des caractéristiques de la cuvette d'affaissement. La structure réduit clairement les déplacements de sol et permet donc de réduire les dommages. L'impact de l'affaissement sur la structure dépend également de sa position par rapport à la cuvette d'affaissement. Une structure en bordure de la cuvette est plus influencée qu'une structure se trouvant dans la partie centrale de la cuvette.

Ces premiers résultats ne répondent pas à toutes les questions, il serait intéressant de développer les conséquences de cette étude de mouvements de terrain sur la structure de surface en tenant compte de la rigidité et de la nature de la structure, ainsi que de la géométrie ou la profondeur de cavité qui peuvent également avoir certains impacts.

5. Références

- Atkinson J.H., Potts,D.M. (1977) Subsidence above shallow tunnels in soft ground, Jnl.Geot.Eng.Div., ASCE, vol: GT4, 307 - 325
- Burland J.B. (1995) Assessment of risk of damage to buildings due to tunneling and excavations. Invited special lecture, Proc. 1st Int. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering.Tokyo. 1189-1201
- Caudron M., Emeriault, F., Al Heib M. (2008) Collapses of Underground Cavities and Soil-Structure Interactions: Influences of the Position of the Structure Relative to the Cavity. Proc. 12th Int. Conf. of IACMAG, India, 2008, 1300-1307
- Caudron M., Mathieu P., Emeriault F., Al Heib M. (2004) Effondrement de cavités souterraines et interaction avec les ouvrage en surface : approche expérimentale sur modèle analogique bidimensionnel. Journées Nationales de la Géotechnique et de la Géologie pour l'Ingénieur, Lille, juin 2004, 435-442.
- Deck O. (2002) Etude des conséquences des affaissements miniers sur le bâti. Proposition pour une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité du bâti. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine INP, (242 p)
- Peck R. B. (1969) Deep excavation and tunneling in soft ground. Proc. 4th Int. Conf. of Soil Mechanics,Mexico, State-of-art, 225-290
- Potts D.M., Addenbrooke, T.I. (1997) A structure's influence on tunneling induced ground movements. Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng. 125 (2). 109-125
- Standing J., Burland J.B. (2008) Impact of underground works on existing infrastructure. Post-Mining'08, Nancy (France). Invited Lecture